



AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR CENOSFERA EM ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

Karolina Girardi Rossi (1), Elaine Guglielmi Pavei Antunes (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)karolrossi19@hotmail.com, (2)elainegpa@unesc.net

RESUMO

Incorporar a sustentabilidade nas atividades da construção civil de forma correta pode acarretar em mudanças positivas em seu desempenho. Busca-se através deste estudo, melhorar propriedades da argamassa de revestimento com a substituição parcial do agregado miúdo por cenosfera, que são partículas que enclausuram ar durante a combustão e são ocas em seu interior, apresentando baixa densidade, entre 0,60 e 0,90 g/cm³, baixa condutividade térmica, grande resistência a fluência, à propagação de fissuras e choques térmicos. Sendo assim uma análise do comportamento da cenosfera quando substituída parcialmente por agregado miúdo em percentuais de 30%, 45% e 60% foi feita. O traço utilizado no estudo como referência foi de 1:3 (cimento:areia), os percentuais foram substituídos no traço em massa e com os teores de cenosfera sendo substituídos em massa e volume, isto devido à grande variação granulométrica entre os dois constituintes da substituição. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de compressão, tração na flexão, módulo de elasticidade, índice de vazios, absorção e massa específica. Baseado nestes ensaios verificou-se que em algumas substituições houveram perdas de resistências, porém com a substituição da cenosfera em massa, esses valores foram relativamente baixos, pois a relação água/cimento apresentou um valor elevado, devido a área específica da cenosfera quando comparada com a areia, já os resultados da substituição em volume mostraram que quando substituído em até 30%, sua resistência mecânica é equivalente a composição referencial, e a partir deste ocorre uma diminuição este valor.

Palavras chaves: Argamassa de revestimento, cenosfera, resistência mecânica, capacidade de absorver movimentações.

1. INTRODUÇÃO

A argamassa é um dos principais componentes utilizados na construção civil, pode ser de assentamento e/ou revestimento, é uma mistura homogênea constituída por agregado miúdo, aglomerante e água, podendo ou não ter a presença de aditivos (ABNT NBR 13281: 2005).

De acordo com Silva e Fortes (2011) o revestimento argamassado apresenta importantes funções, dentre as quais, destacam-se:

[...]a de proteger os elementos de vedação dos edifícios da ação direta dos agentes agressivos, o isolamento termo acústico, a de regularizar na superfície dos elementos de vedação, o que serve de base regular e adequação ao recebimento de outros revestimentos. A execução da fachada é uma fase da construção que exige mão-de-obra e materiais de boa qualidade (SILVA; FORTES, 2011, p-1)[...].

Para satisfazer tais funções, a de trabalhabilidade, retração, aderência, resistências mecânicas, módulo de elasticidade, permeabilidade a água e a capacidade de absorver movimentações são essenciais (ISAIA, 2007).

Para Bastos (2008) e Baía e Sabbatini (2000) o revestimento argamassado deve ter capacidade de deformação. Quando há o impedimento da deformação na argamassa endurecida e aderida a uma base porosa surgem tensões de tração, compressão e cisalhamento no local, e assim, provocar fissuras indesejadas.

Buscando-se novas alternativas, composições e traços, para argamassas de revestimento com melhor desempenho frente às condições de exposição ao qual elas estarão sujeitas surge a cenosfera, que além de suas propriedades possivelmente benéficas propicia, também, um desenvolvimento sustentável.

Hanif et al. (2017) e Ahmaruzzaman (2010) definem as cenosferas como esferas de alumino-silicatos vazios obtidos como resíduo da combustão do carvão. Devido à natureza oca sua densidade geralmente varia de 0,60 a 0,90 g/cm³, um atrativo para a produção de compostos leves. É uma partícula de baixa condutividade térmica, grande resistência a fluência, à propagação de fissuras e choques térmicos (Wang et al. 2015). Fatores que tendem a diminuir o módulo de elasticidade e assim melhorar o desempenho das argamassas.

Em Santa Catarina está localizada o maior complexo termoeletrico a carvão da América do Sul, comandada por Engie Energia, esta atua na implantação de usinas geradoras de eletricidade (Tractebel Energia, 2017). Porém neste local ainda não existe sistema de coleta e separação dos rejeitos gerados pela empresa, sendo assim o material pode ser descartado juntamente as cinzas pesadas ou destinada a produção de cimento junto as cinzas volantes (SOUZA, 2016).

Estudos já realizados com cenosfera comprovam que a utilização da mesma como agregado miúdo melhora a eficiência de materiais cimentícios, afirmando que quando substituída em até dois terços da fração de areia, mostrou-se que suas resistências

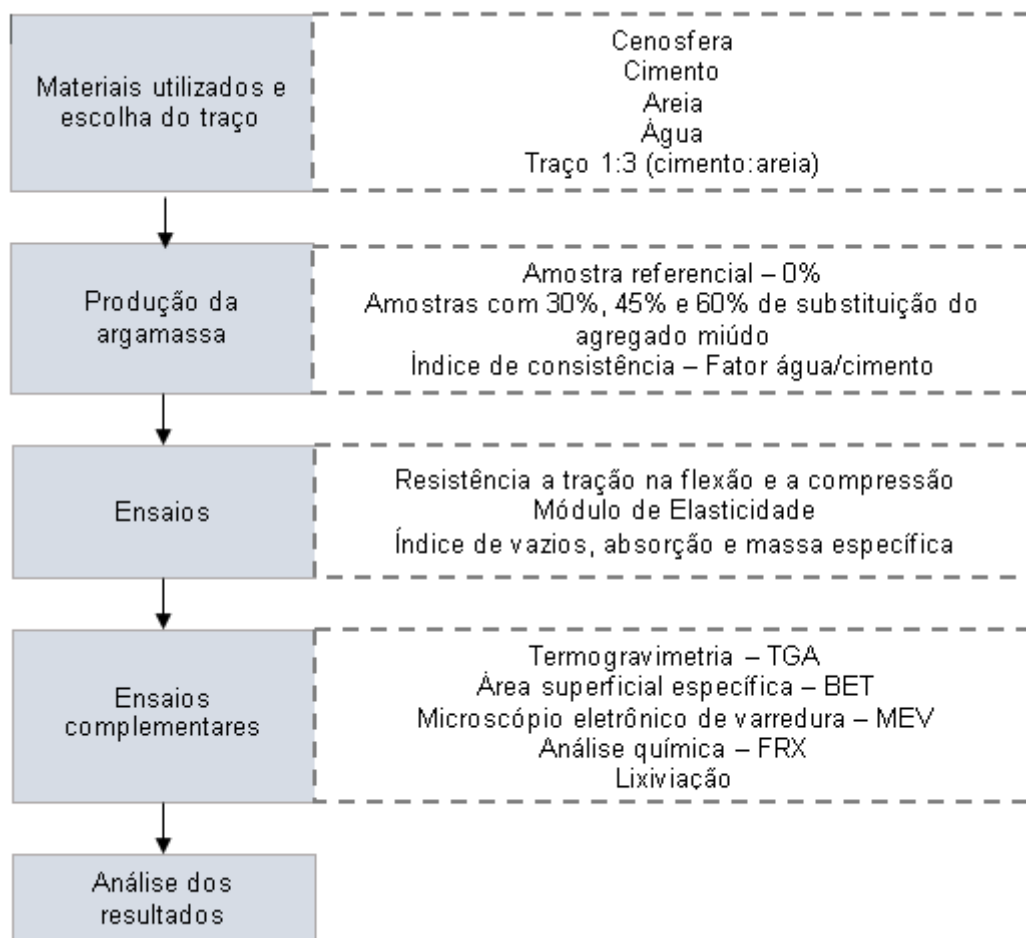
mecânicas são equivalentes a uma amostra que não apresenta a adição de cenosfera, porém com o mesmo traço, e sua densidade significativamente reduzida (SOUZA, 2016).

Com base nas informações relatadas, o presente trabalho busca avaliar a influência nas propriedades mecânicas de resistência a tração na flexão e compressão e módulo de elasticidade, da substituição fracionária, do agregado miúdo por cenosfera, de argamassa de revestimento, através de substituições em volume e em massa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais do presente artigo estão descritos no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma



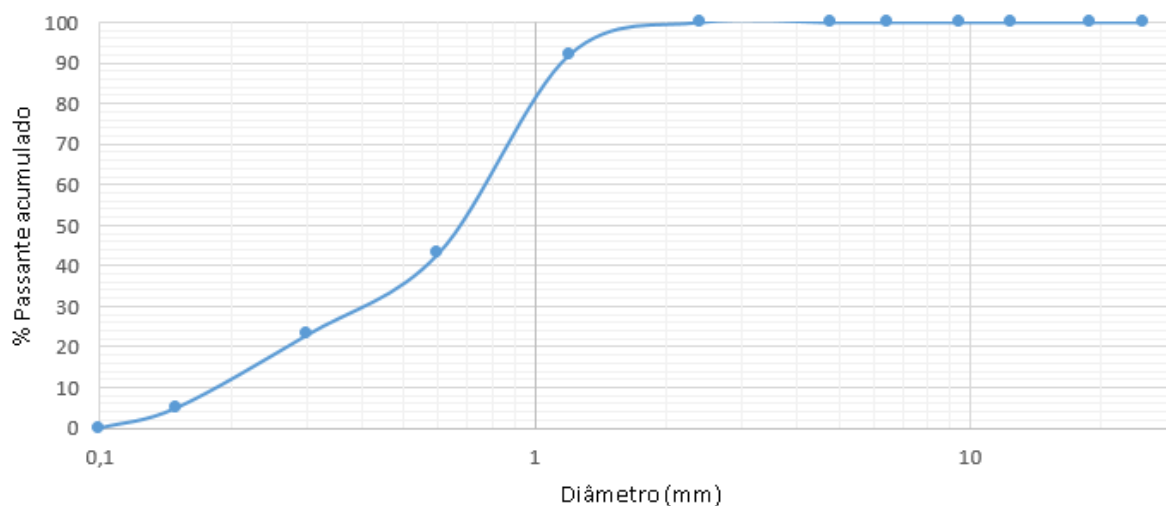
Fonte: do Autor, 2017

2.1 MATERIAIS

O Cimento Portland classificado pela ABNT NBR 5736:1991 como CP II - Z, classe 32, com massa específica de $2,95 \text{ g/cm}^3$ foi utilizado em todos os ensaios.

O agregado miúdo, utilizado no ensaio apresenta módulo de finura de 2,37, diâmetro máximo de 2,4mm, conforme descrito na ABNT NBR NM 248:2003, sua massa específica de $2,62 \text{ g/cm}^3$, seguindo o ensaio estabelecido conforme prescrito a ABNT NBR NM 52:2009, sua análise granulométrica encontra-se na Figura 2.

Figura 2 - Análise granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Do Autor, 2017

A cenosfera foi coletada de uma das bacias de uma termoelétrica, administrada pela Engie Energia. A facilidade em sua separação é proveniente de sua baixa massa específica quando comparada com a água, sendo assim ela boia.

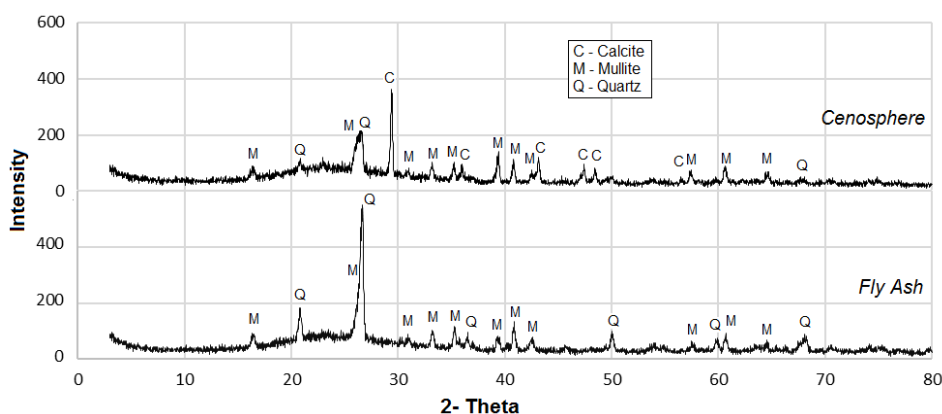
Na análise granulométrica pode-se verificar que o tamanho médio das partículas é $247,68 \mu\text{m}$ e diâmetros característicos D10, D50 e D90 de, respectivamente, $120,82 \mu\text{m}$, $234,77 \mu\text{m}$ e $405,21 \mu\text{m}$.

No Instituto de Engenharia e Tecnologia (IDT/UNESC) analisou-se a mineralogia da cenosfera por meio da Difração de Raio X - DRX e comparada com as fases cristalinas da cinza volante provinda do mesmo processo de combustão.

Conforme já discutido por Souza (2016), a mineralogia presente na cinza volante é diferente da apresentada na cenosfera, o composto é formado por calcita, quartzo e

mulita, interessantemente diferentes dos apresentados na cinza leve, que apresenta apenas quartzo e mulita, este é responsável pela estabilidade térmica que a cenosfera apresenta. A Figura 3 apresenta a mineralogia da cenosfera e da cinza volante.

Figura 3 - Mineralogia da Cenosfera e Cinza Volante do mesmo processo de combustão



Fonte: IDT/UNESC, 2016

2.2 MÉTODOS

O processo para produção das argamassas foi executado no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IDT/UNESC. Todos os corpos de prova foram executados conforme a ABNT NBR 13276: 2016. Adotou-se como traço de referência 1:3 (cimento: areia), em massa, baseado em trabalhos já publicados na área, como o de Belizário Silva et. al (2009) e Lima et. al (2009).

O percentual de substituição, partiu do estudo de Souza (2016), ao qual, em sua pesquisa verificou que, com o traço unitário, para argamassa de assentamento, de 1: 0,35: 4,20 (cimento: cal: areia), a utilização de cenosfera como agregado miúdo, até 60% de substituição, melhorou o fator de eficiência (resistência/densidade seca). Portanto, definiu-se percentuais de substituição de 30%, 45% e 60%, sendo que, neste estudo, os intervalos entre os percentuais de substituição foram menores que os utilizados anteriormente.

É importante mencionar que Souza (2016), apesar de utilizar o traço unitário em massa, para fazer a substituição, primeiramente, ele converteu a quantidade de

agregado miúdo a ser substituída por cenosfera para volume e, isso, conforme o autor, é devido a propriedade de baixa massa específica da cenosfera.

Nesta pesquisa também se empregou o traço unitário em massa, no entanto, fez-se a substituição em dois seguimentos, sendo a primeira delas em massa, ou seja, pela simples substituição dos percentuais do agregado miúdo pela cenosfera. E, no segundo seguimento, fez-se a conversão da quantidade de agregado miúdo que seria substituído por cenosfera de massa para volume, através da utilização da massa específica unitária, seguindo a ABNT NBR NM 45:2006, porém manteve-se constante a relação aglomerante/agregados em volume. Definiu-se, para esse segundo modelo, manter-se fixo a relação aglomerante/agregado pois sabe-se que essa relação pode afetar os resultados mecânicos como resistência à compressão, tração, flexão, e outros, de forma que por apresentarem baixa massa específica, torna-se essa relação um atrativo para a substituição abordada.

Foram utilizados esses dois modelos a fim de verificar-se, com uma maior amplitude, as possibilidades de uso da cenosfera como agregado miúdo. A Tabela 1 apresenta detalhadamente as substituições realizadas.

Tabela 1 - Traços unitários

Amostra		Cimento (Kg e dm ³)	Areia (Kg) – Areia (dm ³)	Cenosfera (Kg) – Cenosfera (dm ³)	Agl/Agr (Volume)
Referencial		1	3 – 1,87	0 - 0	0,53
Substituição em Massa	SM-30%	1	2,1 – 1,33	0,9 – 2,61	0,25
	SM-45%	1	1,65 – 1,03	1,35 – 3,92	0,20
	SM-60%	1	1,2 – 0,75	1,8 – 5,23	0,16
Substituição em Volume	SV-30%	1	2,1 - 1,31	0,1934 – 0,56	0,53
	SV-45%	1	1,65 – 1,03	0,2901 – 0,84	0,53
	SV-60%	1	1,2 – 0,75	0,387 – 1,12	0,53

Fonte: do Autor, 2017

O ensaio de consistência do revestimento argamassado foi realizado conforme a ABNT NBR13276: 2016, sendo fixado o índice de consistência em (260 ± 5) mm, seguindo as diretrizes da norma citada.

Para determinar a resistência à tração na flexão e à compressão, segundo a ABNT NBR 13279: 2005, foram elaborados corpos de prova prismáticos para cada traço,

que apresentam dimensões de 4cm X 4cm X 16cm e as amostras foram ensaiadas aos 28 dias. No ensaio de compressão o equipamento utilizado foi uma Prensa Hidráulica de acionamento elétrico para ruptura de corpos de prova, modelo PCE200PLUS, capacidade máxima 2.000kN (200.000 kgf) e para a determinação da resistência a tração na flexão foi utilizada a Máquina Universal de Ensaio, modelo EMIC 23-600, eletromecânica, microprocessada, marca INSTRON/EMIC, com capacidade de carga de 600kN (60.000 kgf).

Para verificar o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas, segundo a ABNT NBR 15630: 2008, foram elaborados corpos de prova prismáticos de 4cm X 4cm X 16cm. O ensaio de ultrassom faz uma relação entre a velocidade de propagação de onda ultrassônica com a compacidade do material, quanto maior compacidade, maior a velocidade de propagação da onda ultrassônica (MOTA, 2015). Neste ensaio o equipamento utilizado foi o Transdutor de onda de cisalhamento 250 kHz.

Através do ensaio são elaborados gráficos com medições de tempo e amplitude das ondas, para cada amostra, analisa-se pontos específicos, onde inicia-se a amplitude e o local que encontra-se o primeiro grande pico do gráfico, para que assim seja possível a aplicação das fórmulas apresentadas na ABNT NBR 15630: 2008 e a determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson.

A massa específica, absorção e índice de vazios das argamassas foram determinadas, conforme prescreve ABNT NBR 9778:2005, para tal, foram ensaiados três corpos de prova com volume de 150cm³ para cada traço.

Além dos estudos acerca as propriedades mecânicas das argamassas, realizou-se também a caracterização química e micro estrutural das argamassas produzidas e da cenosfera, estes com o intuito de complementar e entender melhor a interação da cenosfera no compósito. As técnicas de caracterização e equipamentos empregados foram:

- Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX): espectrômetro de raios X por dispersão de comprimento de onda;
- Área específica (BET): Quantachrome, modelo: Nova 1200e, Laboratório de Valorização de Resíduos – UNESC;

- Análise Termogravimétrica (TGA) e Análise Termodiferencial (DTA): TA instrument, modelo Q600 simultaneous TGA/DSC, Laboratório de Valorização de Resíduos – UNESC;
- Microscópio óptico Olympus, modelo BX41M-LED – Laboratório de Microscopia – UNESC;
- Microscópio eletrônico de varredura (MeV) Zeiss, modelo EVO-MA-10, do Laboratório de Cerâmica Técnica – CerTec – UNESC;
- Ensaio de Lixiviação, cujo as metodologias utilizadas pelo Laboratório de Solos são baseadas “SW 846-3050B (USEPA 1986, Test Method for Evaluating Solid Waste Report Number SW-846, Washington, DC).”.

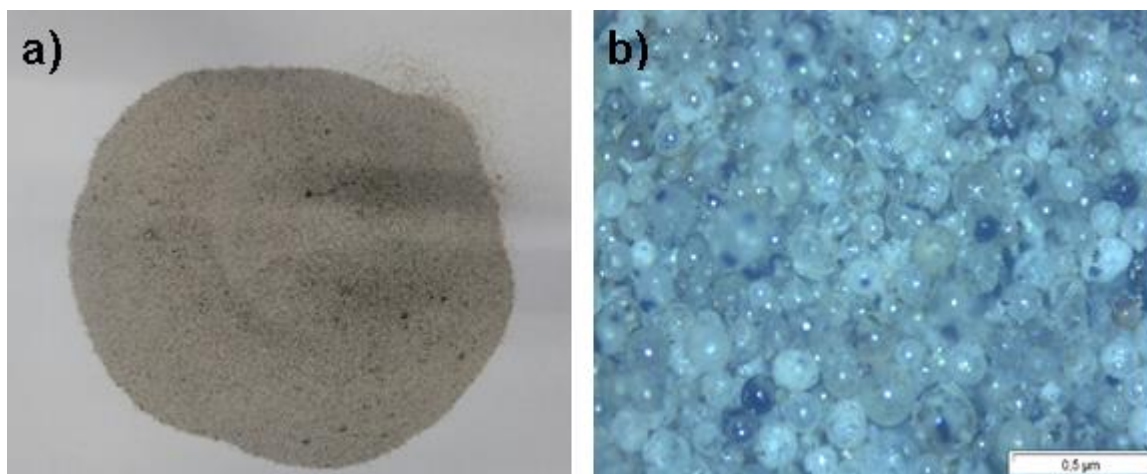
Os resultados obtidos nos ensaios foram analisados estatisticamente através de Análise de Variância (ANOVA), com o intuito de verificar-se a variação entre as populações apresentadas. Os valores são considerados estatisticamente iguais quando o valor de F é inferior ao F crítico e diferentes quando F é superior ao F crítico, enquanto que o valor-p, para este artigo foi adotado 5%, que indica a probabilidade de significância. Quando a análise apresenta resultados estatisticamente diferentes, utilizou-se o Teste Tukey (DHS) ou Diferença da Honestidade Significante de Tukey, para averiguar esta disparidade.

3. RESULTADOS

3.1 CENOSFERA

A cenosfera foi coletada em uma das bacias da termoeletrica, a Figura 4 a), apresenta o resíduo utilizado após o processo de secagem e a Figura 4 b) uma imagem microscópica da cenosfera analisada, confirmando seu formato esférico.

Figura 4 – a) Resíduo após secagem; b) Imagem microscópica da cenosfera



Fonte: Do Autor, 2017

A análise química encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise química da cenosfera.

Elementos	Teor - %
SiO ₂	61,55
TiO ₂	1,05
Al ₂ O ₃	24,53
Fe ₂ O ₃	4,12
MgO	0,94
CaO	1,22
Na ₂ O	0,72
K ₂ O	3,57
P ₂ O ₅	0,06
Perda ao fogo	2,50

Fonte: Do Autor, 2017

Na análise química observa-se que 80% da composição da cenosfera é de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), sendo assim, os principais constituintes de seu envoltório (RHEINHEIMER ET AL, 2017).

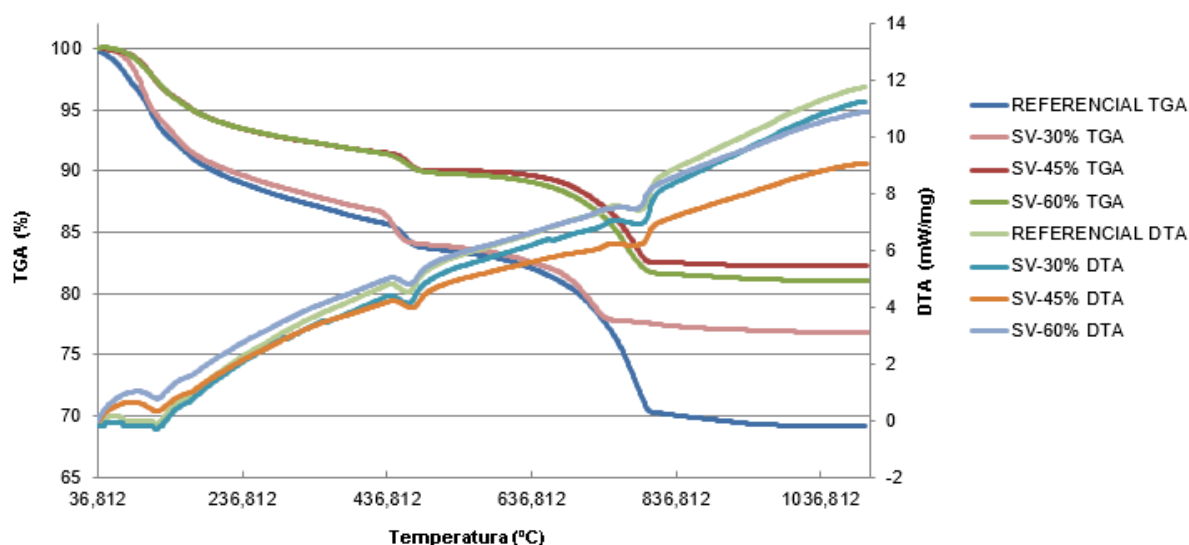
A cenosfera, visualmente, apresenta uma área superficial específica menor quando comparada com o agregado, ao qual, vai ser substituído. Uma análise da área superficial específica (BET) foi feita, nesta constou, para o agregado miúdo utilizado,

uma área superficial específica de $1,022\text{m}^2/\text{g}$. Segundo Hanif et al. (2017), a área específica para a cenosfera com tamanho máximo, aproximadamente, de partículas de $400\mu\text{m}$, com densidade média de $0,72\text{g}/\text{m}^3$ sua área superficial específica é de aproximadamente $6,02\text{m}^2/\text{g}$. Para o ensaio de área específica, Hanif et al (2017), utilizou o mesmo método já abordado para a área superficial específica do agregado, sendo ele de adsorção de nitrogênio.

3.2 ENSAIOS COMPLEMENTARES

A análise termogravimétrica e termodiferencial estão apresentadas na Figura 5, onde consta as amostras com substituição em volume de 30%, 45% e 60% e referencial.

Figura 5 – Análise Termogravimétrica e Termodiferencial



Fonte: Do Autor, 2017

Verificou-se, através da análise termodiferencial, que as perdas de massa ocorrem em temperaturas próximas. O primeiro pico corresponde a temperatura de 100°C a 120°C , onde ocorre a perda de água livre, o segundo pico, aproximadamente na temperatura de 450°C , apresenta a decomposição do hidróxido de cálcio e o terceiro pico, entre as temperaturas de 780°C a 800°C , ocorreram a decomposição dos carbonatos.

A termogravimetria consiste em uma perda de massa das amostras, em função da temperatura a qual estão sujeitas, a partir desta foi possível verificar que a amostra referencial obteve uma perda de massa de 30,75%, com 30% de substituição em volume foi a que mais sofreu perda de massa, relacionada com as amostras que tinham em sua composição, aproximadamente 23,17%, enquanto que as amostras com 45% e 60% de substituição em volume, obtiveram uma redução em sua massa inicial de 17,7% e 18,96%, respectivamente, como observado na Figura 5.

Os compósitos com fração de peso ainda maior de cenosfera são bastante estáveis em alta temperatura (HANIF, 2017), conforme observado na Figura 5, a qual demonstra uma redução significativa das perdas de massas das amostras, quando a temperatura ultrapassa 800°C, comparado com a amostra referencial.

O conhecimento da massa unitária do agregado é de grande importância, pois é por meio dela que se fazem as transformações dos traços em massa para volumes e vice-versa, bem como é um dado interessante para o cálculo do consumo do material empregado por m³ de concreto (MARTINS, 2008). Portanto, é a massa de certo volume de agregado, incluindo os vazios entre os grãos.

A massa unitária dos elementos constituintes da argamassa foram ensaiadas conforme prescrições da ABNT NBR NM 45:2006, sendo que os valores obtidos foram de 0,339g/cm³ para cenosfera, 1,056g/cm³ para o cimento e para o agregado miúdo foi de 1,578g/cm³. É importante a determinação da massa unitária porque é através deste que se faz a substituição do traço.

O ensaio de lixiviação é utilizado para determinar ou avaliar a estabilidade química dos resíduos, quando em contato com soluções aquosas, permitindo assim verificar o grau de imobilização de contaminantes (CAUDURO; ROBERTO, 2002). Este ensaio atendeu as especificações da ABNT NBR 10004: 2004 e ABNT NBR 10005: 2004.

Neste ensaio foram feitas análises de corrosividade e toxicidade. A amostra analisada foi a com 60% de substituição em volume.

O resíduo é caracterizado como corrosivo, pois apresenta pH = 13,5, ultrapassando o limite estabelecido pela norma ABNT NBR 10004:2004, de 12,5. Portanto, o resíduo é classificado como perigoso neste ensaio.

Os parâmetros analisados no extrato do resíduo obtido segundo a ABNT NBR 10005:2004, não apresentam concentrações acima dos limites máximos permitidos

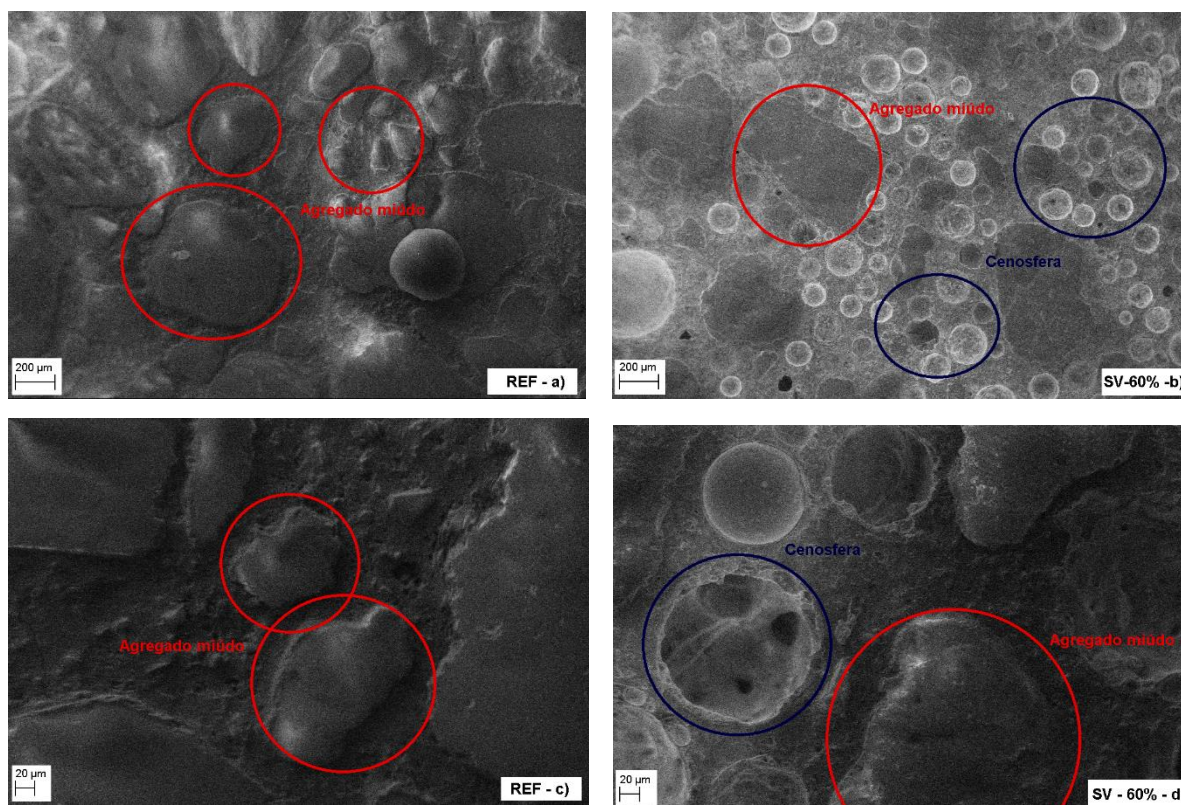
do item toxicidade da norma ABNT NBR 10004:2004. O resíduo é classificado como não perigoso neste ensaio, porém já está classificado como perigoso no item corrosividade.

Com base nos resultados obtidos no decorrer do ensaio, o mesmo é classificado como perigoso - Classe I segundo a norma ABNT NBR 10004:2004, nos parâmetros analisados.

As imagens obtidas através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) encontram-se na Figura 6, sendo elas da amostra referencial (REF) e com 60% de substituição em volume (SV-60%).

Os aumentos realizados foram de 100 e 500 vezes. Sendo que a Figura 6 a) e b) apresentam fator de aumento de 100 e a Figura 6 c) e d) um fator de 500.

Figura 6 – Amostras das séries REF e SV-60%



Fonte: Do Autor, 2017.

Nesta análise foi possível observar a disposição dos elementos constituintes na argamassa, na Figura 6 – a) e c), refere-se as amostras referenciais, onde encontram-se os variados tamanhos de grãos de agregado miúdo. Na Figura 6 – b) e d) apresenta

as amostras com 60% de cenosfera em volume, as quais, ficaram incorporadas na mistura de forma homogênea.

Na Figura 6 b) e d) é possível observar o formato esférico da cenosfera, comprovando a imagem microscópica já apresentada.

3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A relação água/cimento e o índice de consistência das argamassas produzidas com 30%, 45% e 60% de substituição encontram-se na Tabela 3. Nota-se que para respeitar o valor de 260 ± 5 mm *flow-table* estabelecido na ABNT NBR 13276:2016, foi necessário o aumento da quantidade de água da mistura para atender a trabalhabilidade desejada.

Tabela 3 - Relação água/cimento e índice de consistência de cada amostra.

Amostra		Relação água/cimento	Índice de Consistência ($\pm 0,05$ mm)
Referencial		0,50	258,67
Substituição em Massa	SM-30%	1,31	261,11
	SM-45%	1,67	262,50
	SM-60%	2,20	260,67
Substituição em Volume	SV-30%	0,53	260,00
	SV-45%	0,54	256,00
	SV-60%	0,56	260,33

Fonte: Do Autor, 2017

Na Tabela 3 consta o aumento na quantidade de água nas substituições em massa e em volume, este é explicado devido a área superficial específica do agregado (areia), em média $1,022\text{m}^2/\text{g}$, que foi substituído, quando comparado com a cenosfera, $6,02\text{m}^2/\text{g}$ (HANIF ET AL. 2017).

Com o aumento na quantidade de cenosfera nas amostras houve uma necessidade maior de água devido a superfície específica dos materiais analisados, ou seja, quanto maior este valor, maior a relação água/cimento.

Para Souza (2016) a cenosfera, quando incorporada na argamassa, substituindo um agregado com granulometria superior, ela acaba por melhorar a plasticidade da mistura devido ao seu tamanho reduzido.

A quantidade de água necessária para atender as especificações da ANBT NBR 13276: 2016, também estão relacionadas com a absorção de água. Conforme os resultados, apresentados na Tabela 4, é possível analisar que houve um aumento no percentual de absorção, que alcançou 37,144% e 15,445% nas amostras com maiores teores de substituição, quando comparadas com o referencial, que apresenta 8,315%, quando a cenosfera estava incorporada na mistura, conseqüentemente, a quantidade de água relacionada aumentou, para que a trabalhabilidade desejada fosse alcançada.

Tabela 4 - Resumo das propriedades das argamassas

Amostra	Absorção (%) ($\pm 0,1\%$)	Índice de Vazios (%) ($\pm 0,1\%$)	Massa Específica (g/cm ³) ($\pm 0,1\text{g/cm}^3$)
Referencial	8,315	18,063	2,172
SM-30%	23,116	31,128	1,347
SM-45%	30,611	31,527	1,030
SM-60%	37,144	33,591	0,904
SV-30%	11,260	19,606	1,741
SV-45%	12,765	20,035	1,569
SV-60%	15,445	21,557	1,396

Fonte: Do Autor, 2017

Os poros preenchidos com ar ou água, na argamassa, são rotulados como vazios, quando calculados estes vazios em uma argamassa que apresenta cenosfera, a qual, detém estrutura oca, por serem muito semelhantes e com mesma densidade, torna-se quase impossível diferenciá-los, portanto ambos estão incluídos no volume de vazio total estimado (RHEINHEIMER ET AL, 2017). Fato este que justifica o aumento do índice de vazios apresentados na Tabela 4.

As massas específicas das amostras são relativamente menores, quando há incorporação de cenosfera na mistura. Hanif et al. (2017) afirma que está diretamente relacionado com massa específica da cenosfera, que varia entre 0,60g/cm³ e 0,90g/cm³, já que a substituição realizada consta um agregado miúdo com massa específica de 2,62g/cm³. Portanto Blanco et al. (2016), a partir desses conceitos, afirma que com a cenosfera incorporada na mistura é possível diminuir consideravelmente o valor da relação massa/volume da amostra.

Aos 28 dias os corpos de prova foram ensaiados a tração na flexão e a compressão. A Tabela 5 apresenta os valores encontrados para as argamassas de revestimento produzidas. Observa-se através dos resultados, que em ambas substituições os valores das resistências analisadas diminuíram.

Tabela 5: Propriedades mecânicas da argamassa

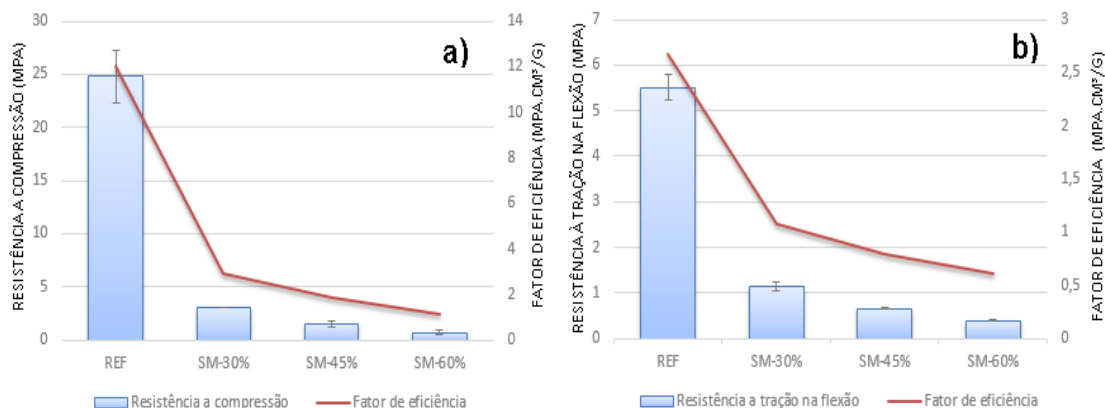
Amostra	Resistência Mecânica aos 28 dias (MPa)	
	Tração na flexão	Compressão
Referencial	5,513 ($\pm 0,28$)	24,807 ($\pm 2,48$)
SM-30%	1,133 ($\pm 0,10$)	3,05 ($\pm 3,05$)
SM-45%	0,653 ($\pm 0,02$)	1,5 ($\pm 1,50$)
SM-60%	0,397 ($\pm 0,02$)	0,717 ($\pm 0,71$)
SV-30%	4,997 ($\pm 0,13$)	20,487 ($\pm 1,02$)
SV-45%	4,676 ($\pm 0,32$)	19,623 ($\pm 2,02$)
SV-60%	4,047 ($\pm 0,07$)	16,88 ($\pm 0,87$)

Fonte: Do Autor, 2017.

Na Figura 7 apresenta-se as resistências obtidas com a substituição em massa do agregado miúdo por cenosfera, com seus respectivos fatores de eficiência (resistência/densidade seca). Como uma das vantagens em substituir o agregado miúdo por cenosfera é sua característica leve, com uma relação resistência/densidade seca, busca-se comprovar que uma argamassa com cenosfera consiste em menor massa específica para a amostra, mas sem perda excessiva de resistência. Porém na substituição em massa, devido à grande queda na resistência esta relação não se mostrou eficaz, diferentemente do ocorrido na substituição em volume.

Através da Figura 7 e da análise estatística percebeu-se que os valores das resistências, quando comparados com a amostra referencial, são todos divergentes, com a substituição em massa os valores de resistência a tração e compressão decaíram consideravelmente. A cenosfera apresenta uma massa específica, que varia de 0,60g/cm³ a 0,90g/cm³ segundo Ahmaruzzaman (2010), valor este inferior à da areia, 2,62 g/cm³, quando substituída em massa o volume de cenosfera necessário para corresponder a massa de areia é superior, de tal forma que a quantidade de água necessária para se obter a trabalhabilidade é maior, comparada com o traço referencial. Portanto a resistência da argamassa diminuiu consideravelmente.

Figura 7 - Resistência à a) compressão e b) tração na flexão com diferentes teores de cenosfera.

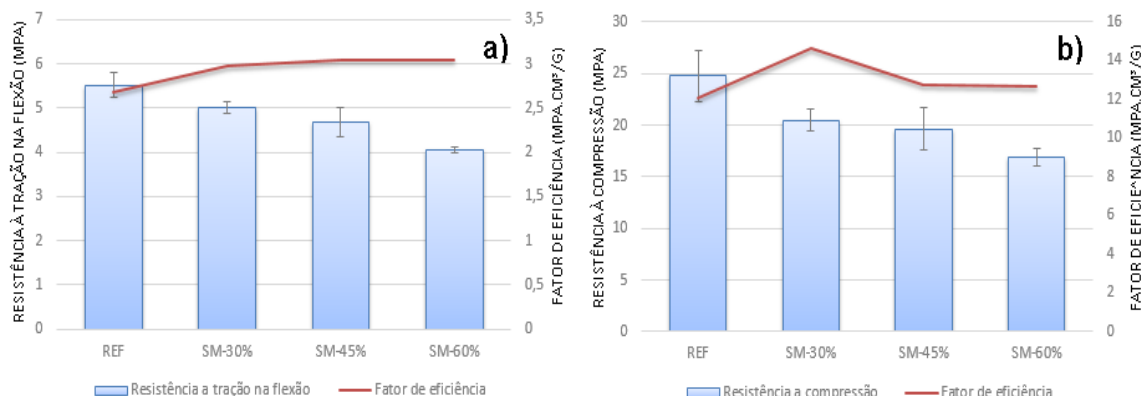


Fonte: do Autor, 2017.

A partir da massa específica, já apresentada na Tabela 4, foi possível observar que as argamassas com maior teor de cenosfera apresentam fator de eficiência (resistência/densidade seca) menores, devido à grande variação da resistência, evidenciando a desvantagem, para as propriedades mecânicas em questão, de substituir o agregado pelo resíduo leve em massa.

Argamassa com diferentes teores de cenosfera foram analisadas, três relações em volume de aglomerante/agregado. Os resultados de compressão e flexão são exibidos na Figura 8.

Figura 8 - Resistência à e a) tração na flexão e b) compressão com diferentes teores de cenosfera.



Fonte: Do Autor, 2017

A Figura 8 e a análise estatística, demonstraram que as resistências a tração na flexão e de compressão, quando a substituição foi feita em volume mostrou-se equivalente, a amostra referencial, se substituída em até 30%, após esta, seus valores decaíram. As amostras que não apresentaram semelhança a referencial, a partir de seus resultados constatou-se uma diminuição, para a substituição em volume de 45%, de 15,18% para a tração na flexão e de 20,90% para a compressão. Na substituição em volume de 60%, a redução para a resistência a tração na flexão foi de 26,60% e para a compressão de 31,95%.

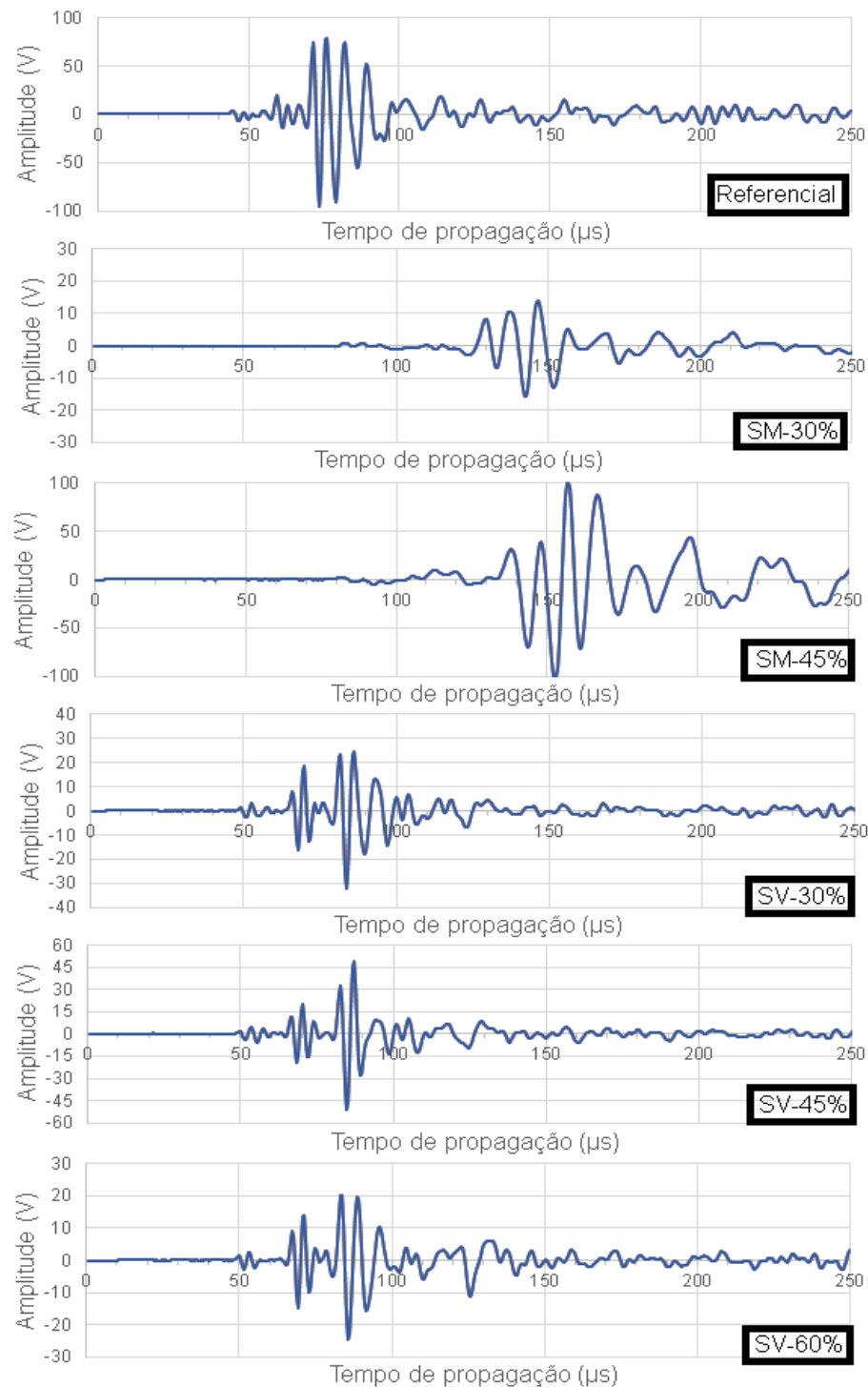
Segundo Hanif et al. (2017), tal fato ocorre devido a composição da cenosfera, que por apresentar estrutura oca, quando substituída em teores maiores acaba gerando um grande valor de vazios, podendo prejudicar a resistência mecânica do revestimento argamassado.

Ao aumentar a relação aglomerante/agregados houveram benefícios no fator de desempenho das argamassas, principalmente quando relacionada com a resistência a tração na flexão, observa-se assim, que as massas específicas, já apresentados na Tabela 4, são relativamente baixas, com o aumento da quantidade de cenosfera nas amostras. Portanto o fator de eficiência, nas condições de substituição em volume, apresentam um bom desempenho, aumentando-o em todas as frações de substituição, em ambos ensaios.

A qualidade e a durabilidade de um revestimento de argamassa estão diretamente ligadas à capacidade de absorver deformações, que são medidas através do módulo de elasticidade (MOTA, 2015), este resultado é influenciado pela porosidade das amostras, portanto se as deformações não forem absorvidas pelo revestimento argamassado, estará mais suscetível à fissuração.

O módulo de elasticidade foi analisado através de gráficos que geraram pulso de ondas pelo transdutor transversal de amplitude por intervalo de tempo, segue a ABNT NBR 15630: 2008, para cada amostra, conforme a Figura 9. Com exceção das amostras com 60% de substituição em massa, pois devido as condições dos corpos de prova não foi possível realizar o ensaio, pois o referido corpo de prova esfarelava.

Figura 9: Pulso de ondas gerado pelo transdutor transversal - 250 kHz



Fonte: Do Autor, 2017

A partir da análise, foi obtido os valores do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Módulo de Elasticidade e coeficiente de Poisson.

Amostra	Coeficiente de Poisson	Módulo de Elasticidade (Gpa)
Referencial	0,18	26,88
SM-30%	0,20	4,79
SM-45%	0,21	3,41
SM-60%	-	-
SV-30%	0,24	17,98
SV-45%	0,22	16,49
SV-60%	0,22	11,53

Fonte: Do Autor, 2017

A análise estatística constatou que os valores para o módulo de elasticidade são todos diferentes para ambas substituições, quando comparados com as amostras referenciais. Portanto, a substituição do agregado miúdo pela cenosfera, seja em massa ou volume, influencia o módulo de elasticidade da argamassa, com reduções de até 57%. Quando o agregado miúdo é substituído por cenosfera há uma necessidade de aumento na quantidade de água para ajudar a revestir as partículas, consequentemente uma redução na elasticidade da argamassa é observada (HANIF ET AL. 2017).

O coeficiente de Poisson é a razão entre a deformação transversal e longitudinal quando, um corpo de prova é submetido a uma carga de compressão axial (SILVA E FORTES, 2011). O comportamento da argamassa mostrou-se regular, ou seja, os valores são estatisticamente iguais e consequentemente as amostras estão, com seus aglomerantes e agregados, bem distribuídos, como já foi possível observar na análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

4. CONCLUSÃO

Na concepção de questões ambientais associadas à eficiência de revestimento argamassados, a reutilização de resíduos tornou-se uma alternativa interessante. A cenosfera, resíduo da combustão do carvão mineral, apresenta características físicas e químicas que auxiliam no desempenho da argamassa, permitindo uma produção mais eficaz em termos de propriedades mecânicas e massa específica.

A metodologia estatística adotada neste estudo demonstrou que as substituições em massa, considerando o traço referencial adotado, não são interessantes, pois há uma

diminuição de resistência à tração na flexão e compressão significativos, já nas substituições em volume, a análise estatística apresentou que com até 30% de substituição em volume, a utilização de cenosfera como agregado miúdo obteve resistência equivalente as amostras referenciais.

O fator de desempenho na substituição em massa não foi eficaz devido à grande variação da resistência, porém nas substituições em volume, este fator foi eficiente, evidenciando a baixa massa específica das amostras com cenosfera.

O módulo de elasticidade de ambas substituições mostrou-se não eficaz quando a cenosfera estava presente na amostra, fazendo com que esta não apresentasse um efeito positivo tendo em vista a elasticidade adquirida na amostra referencial.

De maneira geral, quando o agregado miúdo é substituído em massa por cenosfera suas resistências mecânicas são reduzidas de tal forma que torna-se inviável esta análise. Já a substituição em volume mostrou que quando em até 30% de substituição, as propriedades mecânicas são equivalentes a referencial e apresentam massas específicas reduzidas. Com isso, o presente estudo confirma que a substituição do agregado miúdo por cenosfera é eficaz quanto ao fator de eficiência das amostras.

5. AGRADECIMENTO

Agradecimento à empresa Engie Energia que forneceu a cenosfera durante o decorrer da pesquisa.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Testar outros traços para argamassa, concreto, verificando o desempenho da cenosfera, frente a outras situações;
- Substituir teores inferior a 30%, com um agregado miúdo com granulometria superior à da cenosfera;
- Verificar a possibilidade de substituir a cenosfera por cimento em argamassas.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, Versão Corrigida:1999. (1991).

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, Versão Corrigida 2009. (2008).

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

AHMARUZZAMAN, M. **A review on the utilization of fly ash. Progress in energy and combustion science** 36(3): 327-363. (2010)

BAÍÁ, Luciana Leone Maciel; SABBATINI, Fernando Henrique. **Projeto e execução de revestimento de argamassa**. São Paulo: O Nome da Rosa, 2000. 82 p. (Primeiros passos da qualidade no canteiro de obras) ISBN 8586872148.

BASTOS, Pedro Kopschitz Xavier; LEMONGE, Afonso Celso de Castro; SIGILIANO, Vitor Sathler. **Estudo do Módulo de Elasticidade de Argamassas de Revestimento Sujeitas à Sucção de Água pela Base**. 2010. 10 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010.

CAUDURO, Fernando; ROBERTO Sebastião, **AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE TESTES DE LIXIVIAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS**. Florianópolis, 2002.

F. Blanco, P. García, P. Mateos, J. Ayala, **Characteristics and properties of lightweight concrete manufactured with cenospheres**, [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00357-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00357-4), 2016.

ENGIE (Santa Catarina). **A companhia**. Disponível em:
<<http://www.tractebelenergia.com.br/wps/portal/internet/a-companhia>>. Acesso em:
24 out. 2017.

HANIF, Asad et al. **Properties investigation of fiber reinforced cement-based composites incorporating cenosphere fillers**. Construction And Building Materials. Hong Kong, p. 140-140. 01 mar. 2017.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de construção civil e princípios, de ciência e engenharia da materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. 2 v. ISBN 9788598576183 (v.1) (enc.).

LIMA, Sofia Araújo; SALES, Almir; MORETTI, Juliana Petermann; SANTOS, Tiago José dos. **Análise de argamassas confeccionadas com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao agregado miúdo**: -. 2009. 11 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

MARTINS, Paulo Benjamim Moraes. **INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA AGREGADO MIÚDO NA TRABALHABILIDADE DO CONCRETO**, Feira de Santana, 2008.

MOTA, João Manoel de Freitas. **Reforço de alvenaria resistente com argamassa armada com adição de metacaulim**. 214 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

RHEINHEIMER, Vanessa et al. **Multi-scale study of high-strength low-thermal-conductivity cement composites containing cenospheres**. Cement and Concrete Composites. Singapore, p. 91-103. 07 mar. 2017.

SILVA, Fernanda Belizário; BARROS, Mércia Maria Semensato Bottura de; MONTE, Renata. **Módulo de deformação de argamassas: avaliação dos métodos de ensaio e principais fatores intervenientes**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Epusp, São Paulo, 2009.

SILVA, Juliana Santos Guedes; FORTES, Adriano Silva. **Fissuração nas argamassas de revestimento em fachadas**. Universidade Católica do Salvador, Salvador, 2011.

SOUZA, Felipe Basquiroto de. **Produtos cimentícios ultraleves com cenosfera: viabilidade e aplicação estrutural**. 2016. 23 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unesc, Criciúma, 2016.

TRACTEBEL ENERGIA. Boas Novas. Informativo da Tractebel Energia. Ano 9, Nº 46, 2º trimestre, (2013).

WANG, J.-Y., et al. **Stability of cenospheres in lightweight cement composites in terms of alkali-silica reaction**. Cement and Concrete Research 42(5): 721-727. (2012)